

УДК 621.396.967

Н.П. Кандырин

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## СОБСТВЕННЫЕ ФАЗОВЫЕ ШУМЫ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИНТЕЗАТОРОВ СИГНАЛОВ

*Исследованы собственные шумы цифровых вычислительных синтезаторов сигналов. Проведен анализ выражений для спектральной плотности мощности естественных и фликкер-шумов.*

**Ключевые слова:** ЦСС, спектральная плотность мощности, фазовые шумы.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** Цифровые вычислительные синтезаторы сигналов (ЦСС) широко применяются в различной радиоаппаратуре благодаря ряду достоинств: высокому разрешению по частоте и фазе, цифровому управлению частотой и фазой выходного сигнала, высокому быстродействию. Появление дешевых микросхем полных ЦСС и удобных средств разработки делает их сегодня привлекательными для различных сфер применения.

К недостаткам ЦСС можно отнести высокий уровень дискретных спектральных составляющих, который постоянно уменьшается с повышением разрядности используемых цифровых устройств.

Важным параметром ЦСС является уровень спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов. СПМ фазовых шумов выходного сигнала ЦСС можно представить суммой трех составляющих: шумами источника тактового сигнала с учетом коэффициента передачи ЦСС, шумами квантования и собственными шумами элементов синтезатора [1]. Для СПМ шумов квантования в [2] получено удобное общее выражение, не противоречащее приведенному в [3].

При малой разрядности ЦАП ( $N = 8 - 10$ ) собственные шумы ЦСС существенно меньше шумов квантования, поэтому в ранних публикациях учитывали только шумы квантования [4, 5]. Однако в связи с совершенствованием технологий и появлением новой элементной базы, а также увеличением разрядности ЦАП до 14, тактовые частоты повысились до 1 ГГц, вследствие чего шумы квантования значительно уменьшились и уровень шумов ЦСС определяется «остаточным шумом», обусловленным как раз собственными шумами ЦСС.

**Целью статьи** является исследование собственных шумов различных ЦСС и получение закономерностей для получения выражения СПМ.

### Основной материал

Спектральную плотность мощности собственных фазовых шумов ЦСС предлагается представ-

лять как сумму составляющих, вызванных естественной (тепловой) составляющей и фазовым фликкер-шумом ( $1/f$  шумом) [6, 7]:

$$S_{\text{ЦСС}} = S_{\text{ост}} + S_{\text{флик}}.$$

Прежде всего, количественные уровни естественных шумов ЦСС в основном определяются типом логических элементов, используемых в ЦАП. Так, в работе [4] СПМ указывается на величину -160 дБ/Гц, в [5] -130 дБ/Гц при отстройке от несущей 1кГц. Близкие значения уровней СПМ фазового шума (-165 дБ/Гц) получены в [8, 9].

Теоретические оценки собственных шумов ЦСС приведены в [6, 7, 9].

Для начала воспользуемся полученным в [7] выражением для оценки естественных фазовых шумов ЦСС, вызываемых в основном ЦАП, которое позволяет рассчитать значение СПМ шума для ЦАП при определенных параметрах

$$S_{\text{ест}} = \frac{(\pi k/K)^2}{(\sin(\pi k/K))^2} S_1 + \frac{(\pi k/K)^2 \left[ 3 - \frac{\sin(2\pi k/K)}{2(2\pi k/K)} \right]}{(\sin(\pi k/K))^2} S_2 + S_3, \quad (1)$$

где  $k$  – код, устанавливающий частоту,  $K = 2^N$  – емкость вычислителя кодов фазы (ВКФ),  $N$  – количество разрядов ВКФ,  $k/K = f_{\text{out}}/f_T = K_{\text{ЦСС}}$  – коэффициент передачи ЦСС,  $f_{\text{out}}$  и  $f_T$  – выходная и тактовая частоты ЦСС,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – спектральные плотности мощности шумов эквивалентных источников шума, величины которых определяются элементной базой ЦАП и параметрами входящих в него элементов.

Для конкретного примера ЦАП на ЭСЛ типа К1118ПА1 (К1118ПА3), подставив данные из [7], получаем значения СПМ шумов:

$$S_1 = 10^{-17,4} \text{ 1/Гц}, \quad S_2 = 10^{-17,2} \text{ 1/Гц},$$

$$S_3 = 10^{-18,1} \text{ 1/Гц}.$$

Рассчитаем зависимости СПМ естественного шума по (1) для ЦСС выполненных на дискретных цифровых элементах ЭСЛ логики, которые имеют в своем составе ЦАП К1118ПА1 или К1118ПА3. Зависимости СПМ фазового шума для ЦСС с ЦАП типа К1118ПА1 или К1118ПА3 приведены на рис.1.

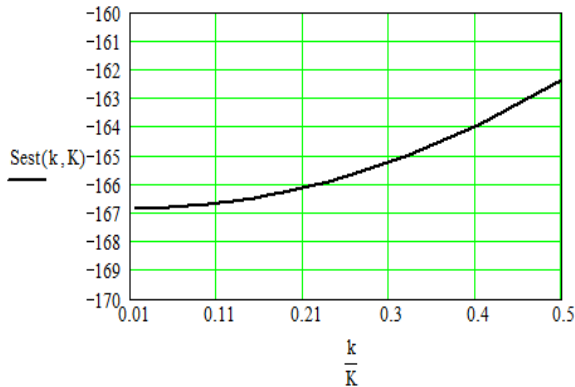


Рис. 1. СПМ естественного фазового шума ЦАП К1118ПА1

Из зависимости рис.1 следует, что величина СПМ шума ЦАП составляет -162...-167дБ/Гц и совпадает с оценками, приведенными выше.

Преобразуя выражение (1) к виду

$$S_{ест} = \frac{(\pi f_{out}/f_T)^2}{(\sin(\pi f_{out}/f_T))^2} S_1 + \frac{(\pi f_{out}/f_T)^2 \left[ 3 - \frac{\sin(2\pi f_{out}/f_T)}{2(2\pi f_{out}/f_T)} \right]}{(\sin(\pi f_{out}/f_T))^2} S_2 + S_3,$$

видим, что естественный шум на выходе ЦАП имеет две составляющие: первая изменяется обратно пропорционально квадрату коэффициента передачи ЦАП

$$K_{ЦАП} = \sin\left(\pi \frac{f_{out}}{f_T}\right) / \left(\pi \frac{f_{out}}{f_T}\right),$$

вторая определяется шумами нагрузки и является величиной постоянной.

Для оценки фликкер-шумов в [6] предложено приближенное выражение для односторонней СПМ шумов ЦАП К1118ПА3

$$S_{кул}(F) = 2k^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-17} \left(\frac{F_N}{F}\right)^{1,5},$$

где  $F_N = 10\text{Гц}$  выбрана как опорная частота.

Постоянная величина  $C$  (в данном случае  $C = 2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-17} \times 10^{1,5}$ ) определяется параметрами конкретного ЦАП. Это выражение получено для  $K = 32$ . После выделения из него соотношения  $k/K$  и преобразования с учетом  $K = 2^N$  и  $k/K = f_{out}/f_T$  получим общее выражение для СПМ фликкер-шума произвольного ЦАП

$$S_{кул}(F) = \left(\frac{k}{K}\right)^2 \cdot C \frac{2^{2N}}{F^{1,5}} = \left(\frac{f_{out}}{f_T}\right)^2 \cdot C \frac{2^{2N}}{F^{1,5}}. \quad (2)$$

Из этого выражения следует, что уровень фликкер-шумов пропорционален квадрату коэффициента передачи ЦСС  $K_{ЦСС}^2 = (f_{out}/f_T)^2$  и величине разрядности вычислителя кодов фазы  $N$ . С помощью этого соотношения можно определить уровень фликкер-шума для любых выходной и тактовой частот.

В других источниках в качестве выражения для СПМ фликкер-шума используются выражения для СПМ шума цифрового делителя частоты

$$S_{кр1}(F) = \frac{10^{-14,7}}{F} \quad [8], \quad S_{кр2}(F) = 10^{-10 \pm 2} \quad [10],$$

но более близким является соотношение для делителя частоты с учетом значения выходной частоты [8]

$$S_{кр}(F) = \frac{10^{-14 \pm 1} + 10^{-27 \pm 1} \cdot f_{out}^2}{F}. \quad (3)$$

Для построения и сравнения СПМ шумов по выражениям (2) и (3) для конкретного ЦСС воспользуемся экспериментальными СПМ шума интегрального синтезатора, например, AD9911 [3].

В этом ЦСС количество разрядов ВКФ составляет  $N = 32$ , тактовая частота  $f_T = 500\text{МГц}$ .

Для случая  $F = 10\text{Гц}$  значение СПМ фазовых шумов составляет  $-129\text{дБ/Гц}$ . Подставляя эти данные в (2), определяем постоянную  $C = 2 \cdot 10^{-28}$ .

Для ЦСС AD9911 СПМ фликкер-шума хорошо аппроксимируется соотношением (3) со следующими коэффициентами

$$S_{кр}(F) = \frac{10^{-13} + 10^{-26,5} \cdot f_{out}^2}{F}. \quad (4)$$

На рис. 2 и 3 приведены зависимости СПМ фликкер-шумов, рассчитанные по формулам (2) и (4), а также экспериментальные СПМ синтезатора AD9911 для двух значений выходных частот ЦСС.

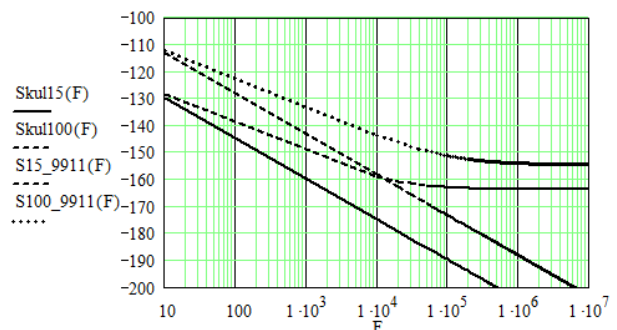


Рис. 2. Экспериментальные СПМ фазовых шумов ЦСС типа AD9911 для выходных частот 15 МГц (пунктирная), 100 МГц (точки) и СПМ фликкер-шума по выражению (2) (прямые линии)

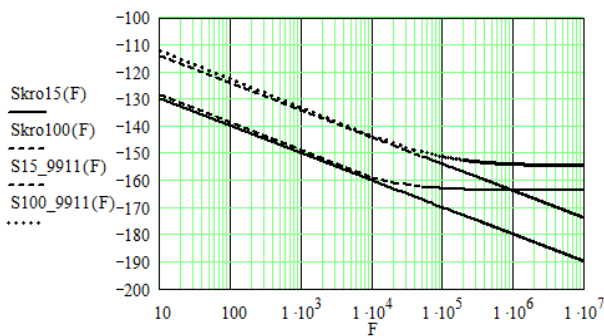


Рис. 3. Экспериментальные СПМ фазовых шумов ЦСС типа AD9911 для выходных частот 15 МГц (пунктирная), 100 МГц (точки) и СПМ фликкер-шума по выражению (4) (прямые линии)

Анализ построенных зависимостей показывает, что экспериментальная СПМ в области фликкер-шумов наиболее точно аппроксимируется выражением (4) рис.3, немного отклоняясь при малых частотах отстройки 30 – 50 Гц. Поэтому при аппроксимации СПМ шумов ЦСС вычислительного типа необходимо учитывать фазовый фликкер-шум, СПМ которого пропорциональна  $1/F$  и белый шум, СПМ которого пропорциональна  $1/F^2$ .

При использовании в (2) показателя степени частоты  $F$ , равного 1, получаем выражение

$$S_{kul}(F) = \left(\frac{f_{out}}{f_T}\right)^2 \cdot C \frac{2^{2N}}{F}, \quad (5)$$

по которому построенные СПМ фликкер-шума совпадают с экспериментальными характеристиками ЦСС AD9911 (рис. 4).

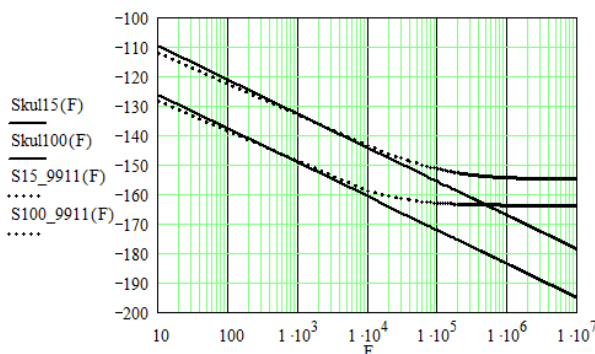


Рис. 4. Экспериментальные СПМ фазовых шумов ЦСС типа AD9911 для выходных частот 15 МГц (точки), 100 МГц (точки) и СПМ фликкер-шума по выражению (5) (сплошные прямые)

На основании исследования теоретических и экспериментальных исследований СПМ собственных шумов ЦСС в [2] также предлагается представить в следующем виде

$$S_{ЦСС} = \left(\frac{f_{out}}{f_T}\right)^2 \cdot \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4}\right) + 10^{k_3}, \quad (6)$$

где обозначены составляющие:

$10^{k_4}$  - уровень первой естественной составляющей СПМ фазового шума, определяемой шумами генераторов тока и флуктуациями напряжения смещения ЦАП;

$10^{k_3}$  - уровень второй естественной составляющей СПМ фазового шума, определяемой шумами нагрузки и не зависящей от синтезируемой частоты;

$10^{k_1}$  - уровень составляющей фазового фликкер-шума;

$10^{k_2}$  - уровень составляющей белого частотно-го шума.

Это соотношение справедливо для  $K_{ЦСС} \leq 0,4$ , когда можно не учитывать коэффициент передачи ЦАП

$$\left(\frac{\sin\left(\pi \frac{f_{out}}{f_T}\right)}{\left(\pi \frac{f_{out}}{f_T}\right)}\right)$$

и уменьшении вследствие этого амплитуды сигнала с увеличением синтезируемой частоты. При этом коэффициенты  $k_i$  рассчитываются по экспериментальным шумовым характеристикам ЦСС.

## Выводы

Проведенный анализ показал, что СПМ в области фликкер-шумов наиболее точно можно аппроксимировать с помощью выражения (4), а в целом СПМ собственных шумов вычислительных ЦСС с помощью выражения (6). Таким образом, предложенные выражения аппроксимации СПМ собственных шумов ЦСС удобно применять для расчетов шумовых характеристик формирователей сигналов на основе вычислительных ЦСС.

## Список литературы

1. Ромашова Л.В. Моделирование спектральных характеристик цифровых вычислительных синтезаторов частот / Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов // Проектирование и технология электронных средств. – 2010. - №1.
2. Ромашова Л.В. Анализ шумов квантования цифровых вычислительных синтезаторов / Л.В. Ромашова // Перспективные технологии в средствах передачи информации. Материалы IX Международной научной конференции. – Владимир, 2011.
3. A. Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. 1999, Analog Devices Inc. Available: <http://www.Analog.com>.
4. Jouko Vankka. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications: dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. – Helsinki University of Technology, 2000. – 208c.
5. Goldberg, Bar-Giora. Digital Frequency Synthesis Demystified DDS and Fractional – N PLLs. 1999 by LLH Technology Publishing.
6. Kuleshov V.N. 1/f Fluctuations Sources in Direct Digital Frequency Synthesizers and Their Contribution to the Output Oscillations Power Spectral Density / Kuleshov V.N. // Proc. 1995 IEEE int. Freq. Control Symposium. – P. 282-287.

7. Kuleshov V.N. *Fundamental noise in direct digital frequency synthesizers* / Kuleshov V.N., Liu Y.H. // *Proc. 1995 IEEE int. Freq. Control Symposium.* – P. 288-293.

8. Kroupa V.F. *Phase Lock Loops and Frequency Synthesis* / V.F. Kroupa. - John Wiley & Sons, Ltd, 2003. – 320 c.

9. Kroupa V.F. *Discrete Spurious signals and Background Noise in Direct Digital Frequency Synthesizers* / V.F. Kroupa // *Proc. 1993 ITTT int. Freq. Control Symposium.* – P. 242-250.

10. Kroupa V.F. *Direct Digital Frequency Synthesizers* / V.F.Kroupa. - John Wiley & Sons, Ltd, 1998. – 396c.

Поступила в редколлегию 12.03. 2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ВЛАСНІ ФАЗОВІ ШУМИ ЦИФРОВИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИНТЕЗАТОРІВ СИГНАЛІВ

М.П. Кандирін

*Досліджено власні шуми цифрових обчислювальних синтезаторів сигналів. Проведено аналіз виразів для спектральної щільності потужності природних і фліккер-шумів.*

**Ключові слова:** ЦСС, спектральна щільність потужності, фазові шуми.

### OWN PHASE NOISE OF THE DIGITAL COMPUTER SYNTHESIS

N.P. Kandyrin

*The self-noise of the direct digital synthesizers have been investigated. The analysis of the formulas for the spectral density of the power of the fundamental and flicker noise has been affected.*

**Keywords:** DDS, power spectral density, phase noise.